

基于高密度电法的镇雄五德天坑岩溶结构识别与空间分布特征研究

潘骏琪^{1*}, 凡净^{1,2,3,4#}, 范弢¹

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²昭通学院地理科学与旅游学院, 云南 昭通

³云南智慧乡村与农文旅融合创新发展重点实验室, 云南 昭通

⁴昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年5月21日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

高密度电法具有探测效率高、分辨率高及电极布设灵活等优势, 在岩溶结构识别与地下空间探测中应用广泛。为查明镇雄五德天坑区岩溶结构形态及空间分布特征, 本文布设二维高密度电法测线开展系统探测, 并结合电阻率剖面解译与区域地质资料分析, 确定了基岩界面起伏及岩溶发育部位。在此基础上, 对多测线数据进行三维综合处理, 通过反演成像、三维可视化及多尺度切片分析, 系统刻画岩溶结构的垂向特征与平面展布, 圈定岩溶发育强烈区及潜在溶洞范围。结果表明高密度电法可有效识别由溶洞及破碎带引起的低阻异常, 识别出A1、A2两处典型异常; 基于L1~L8测线的三维联合反演, 揭示了天坑北侧岩溶通道的空间展布, 并准确推断边缘塌陷带位置; 岩溶发育受NE向构造裂隙及碳酸盐岩层理共同控制, 地下水活动对岩溶扩展及天坑演化具有重要作用。

关键词

高密度电法, 岩溶, 地质结构, 空间分布, 镇雄天坑

Study on Karst Structure Identification and Spatial Distribution Characteristics of the Wude Tiankeng in Zhenxiong Based on ERT

Junqi Pan^{1*}, Jing Fan^{1,2,3,4#}, Tao Fan¹

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²School of Geographic Science and Tourism, Zhaotong University, Zhaotong Yunnan

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 潘骏琪, 凡净, 范弢. 基于高密度电法的镇雄五德天坑岩溶结构识别与空间分布特征研究[J]. 自然科学, 2026, 14(3): 356-365. DOI: 10.12677/ojns.2026.143040

³Yunnan Key Laboratory of Smart Villages and Agri-Cultural-Tourism Integration, Zhaotong Yunnan

⁴Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Received: April 15, 2026; accepted: May 21, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

Electrical resistivity tomography (ERT) offers advantages including high detection efficiency, high resolution and flexible electrode deployment, and have been widely applied in karst structure identification and subsurface exploration. In order to investigate the morphology and spatial distribution characteristics of karst structures in the Wude Tiankeng area of Zhenxiong, a series of two dimensional ERT survey lines were deployed for systematic detection. The undulation of the bedrock interface and the locations of karst development were identified through the interpretation of resistivity profiles combined with regional geological data. On this basis, three dimensional integrated processing of multiple survey lines was conducted. Through inversion imaging, three dimensional visualization and multi scale slicing analysis, the vertical characteristics and planar distribution of karst structures were systematically characterized, and zones of intensive karst development as well as potential cave ranges were delineated. The results indicate that ERT can effectively identify low resistivity anomalies caused by karst caves and fractured zones, and two typical anomaly zones designated as A1 and A2 were recognized. The three dimensional joint inversion of survey lines L1 to L8 reveals the spatial distribution of karst conduits on the northern side of the tiankeng and enables accurate inference of the marginal collapse zone. Karst development is jointly controlled by northeast trending structural fractures and carbonate rock bedding, while groundwater activity plays a critical role in karst expansion and tiankeng evolution.

Keywords

ERT, Karst Structure, Geological Formation, Spatial Distribution, Zhenxiong Tiankeng

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩溶是碳酸盐岩在地下水长期溶蚀作用下形成的一类复杂地质现象,在我国西南及华南地区分布广泛[1]-[4]。在岩溶发育区,地下常形成溶洞、裂隙及暗河等结构,其空间分布复杂且隐蔽性强,容易引发地面塌陷、隧道突水及地基失稳等工程地质问题[5][6]。滇东北地区碳酸盐岩广泛分布,受构造活动与地下水溶蚀共同影响,岩溶地貌发育明显。云南昭通镇雄县五德天坑为典型岩溶塌陷地貌单元,区域内溶洞、裂隙及岩溶通道较为发育,在一定条件下可能诱发塌陷或地表变形,对区域工程建设与地质环境安全构成潜在威胁。

传统岩溶调查主要依赖钻探手段,虽然能够直接揭露地下岩溶发育情况,但受钻孔数量和成本限制,其结果具有明显的局部性,难以全面反映岩溶结构的分布特征[7][8]。地球物理探测技术在岩溶调查中的应用不断增加,其中高密度电法作为一种基于地下介质电阻率差异的电法勘探技术,具有布点密集、信息量丰富、探测效率高和成像直观等特点,在岩溶地质调查和工程勘察中得到了广泛应用。研究表明,

岩溶溶洞、裂隙及破碎带通常表现为明显的电阻率异常，其中充填黏土或含水介质的岩溶体多呈低阻特征，而未充填溶洞则可能表现为局部高阻异常[9]-[13]。Malakowski 等[14]通过系统研究指出，多电极电阻率成像能够有效识别溶洞、裂隙及土岩界面结构，并通过反演技术重建地下电性分布特征，在复杂岩溶区具有较高的探测精度。Liu 等[15]在岩溶区开展准三维电阻率层析研究，结果表明，多剖面联合反演能够更加准确地揭示地下岩溶通道及空洞的空间分布特征，提高岩溶结构识别能力。此外，张建太等[16]通过综合分析多种地球物理方法在岩溶探测中的应用效果，指出电阻率成像在溶洞识别、岩溶通道探测以及塌陷危险区评价方面具有明显优势。前期研究为岩溶区地下结构识别及地质灾害评估提供了重要技术基础，也为高密度电法在岩溶区的进一步应用提供了理论依据[17]-[19]。

本文以云南昭通镇雄县五德天坑为研究对象，开展高密度电法剖面探测，并结合区域地质资料与三维空间分析，对研究区岩溶结构进行综合识别与空间分布特征研究，建立适用于研究区的岩溶电性异常识别特征，分析岩溶结构与构造裂隙之间的空间关系，揭示天坑周缘岩溶通道的空间展布规律。

2. 探测物性基础及三维可视化

高密度电法是以地下岩土体电性差异为基础，通过多电极阵列与多芯电缆在地表建立稳定直流电场的一种地球物理探测方法。在实际观测中，通过 A、B 供电电极向地下介质注入电流，在 M、N 测量电极之间获取电位差，根据欧姆定律计算视电阻率：

$$\rho = K \cdot \frac{\nabla U_{MN}}{I} \tag{1}$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \tag{2}$$

式中，K 为装置系数。一般常用的采集装置有 α 装置(AMNB 排列)， β 装置(ABMN 排列)， γ 装置(AMB N 排列)等。以 α 装置为例，反映地下介质电性分布特征(图 1)。

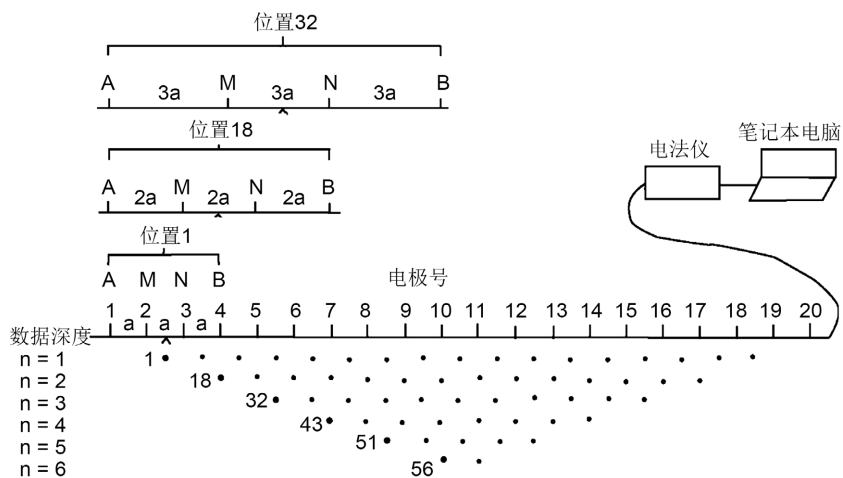


Figure 1. Schematic diagram of high density electrical method detection principle
图 1. 高密度电法探测原理示意图

采集野外高密度电法数据后，先进行数据预处理，包括测线拼接、异常值剔除及数据质量评估等步骤；再对处理后的数据开展反演计算以获取地下电阻率分布特征。综合考虑反演稳定性与计算效率，本文采用圆滑约束最小二乘反演方法对观测数据进行处理，其方程为：

$$(J^T J + \lambda C^T C) \bar{P} = J^T \bar{g} \quad (3)$$

式中, J 为雅可比偏导矩阵, 用于描述模型参数与观测数据之间的敏感性关系; λ 为阻尼系数, 用于平衡数据拟合与模型平滑程度; C 为二维平滑约束算子; Δm 为模型参数修正向量; Δd 为观测视电阻率与理论响应之间对数差值构成的残差向量。该方法通过迭代优化实现对地下电性结构的稳定反演, 从而获得反映岩溶发育特征的二维电阻率剖面。

3. 岩溶区概况及探测布设

3.1. 研究区概况

研究区位于云南省昭通市镇雄县五德天坑及其周缘地区, 属典型岩溶发育区。区内地层以石炭系—二叠系碳酸盐岩为主, 主要包括灰岩和白云质灰岩, 并夹少量砂岩、页岩互层, 较完整记录了晚古生代以来的沉积演化过程。早石炭世林地组(C11)主要由石英砂岩和砂砾岩组成, 局部夹粉砂岩, 反映滨海—浅海沉积环境; 晚石炭世经畲组(C2j)以粉砂岩、泥岩与中厚层石英砂岩互层为主, 显示沉积环境由海相向陆相过渡; 二叠系文笔山组(P2w)主要为灰黑色粉砂岩和页岩, 富含有机质。第四系覆盖层主要包括更新世砂质黏土、泥质砂砾卵石层及全新世洪积—冲积沉积物, 反映新生代以来河流搬运与堆积作用的持续影响。



Figure 2. Geographic location and field survey map of Wude Tiankeng karst cave
图 2. 五德天坑溶洞地理位置及实勘图

从图 2 构造背景看, 研究区整体以单斜构造为主, 断裂构造相对不发育, 岩层倾向 NE15°~20°, 倾角约 25°~35°。石炭系灰岩与二叠系碎屑岩接触带由于岩性差异明显、渗透性不均, 往往成为地下水汇集与溶蚀作用增强的有利部位, 是岩溶重点发育区。本文沿天坑及其周缘布设多条高密度电法剖面, 通过交叉测线组合覆盖主要溶蚀区、裂隙发育区及疑似地下通道区, 以提高地下异常体空间识别精度。

3.2. 岩溶地电响应机理

高密度电法基于地下介质电性差异开展探测, 研究区内岩溶体、裂隙带及不同地层在电阻率上具有显著差异。研究区覆盖层主要为第四系松散沉积物及残坡积黏性土, 下伏基岩为碳酸盐岩及碎屑岩组合, 其中灰岩等可溶性岩石在长期溶蚀作用下易形成溶洞及裂隙结构。区域内构造以节理裂隙为主, 岩溶多沿裂隙发育, 裂隙及溶洞常被黏土、碎石或地下水充填, 从而形成明显的电性差异结构。研究区地下水类型主要包括上覆松散层中的滞水及基岩中的岩溶裂隙水。上层滞水主要赋存于第四系覆盖层中, 受大

气降水及地表水补给，其分布不连续且水量较小；岩溶裂隙水主要赋存于基岩裂隙及溶洞系统中，受上覆含水层渗透补给及侧向径流控制，具有较强的空间非均一性。地下水的赋存状态与含水程度直接影响地层电阻率特征，是电法识别岩溶的重要物理基础。

Figure 1. Statistical summary of electrical properties of karst media in the study area

表 1. 研究区岩溶介质电性特征统计

序号	分类	类型	电阻率/(Ω·m)
1	覆盖层	素填土及残坡积土	20~800
2	覆盖层	黏土及含水土层	10~50
3	基岩	灰岩及白云岩	200~1500
4	岩溶充填物	富水裂隙及溶蚀泥质充填	30~800
5	岩溶空隙	溶洞(空气充填)	极大

研究区物性统计见表 1，在视电阻率剖面上，第四系松散覆盖层由于结构疏松、孔隙率高且含水性较强，通常表现为低阻或电性不均层；当表层土体较为干燥时，则可呈现相对高阻特征。完整基岩因致密性较高，一般表现为高电阻率异常；而在灰岩等可溶岩中，若发育岩溶裂隙或溶洞，并被水体或黏土充填，则常表现为低阻异常区。

3.3. 高密度电法测线布设

镇雄五德天坑溶洞东西向约 300 m，南北向约 500 m。经实地踏勘，主要探测目标为溶洞深部隐伏构造，测线方向为南北向，单条测线长度 357 m，采用温纳装置，电极间距 5 m。由于溶洞的不规则性，要获取整个场区溶洞底界面的形态，需按照一定的原则布置测线；经现场踏勘，电法测线布置以测线覆盖整个溶洞为前提，按照每两条测线间距 20 m~10 m 的原则布置测网，测线按照东西走向布置，共布置 8 条测线，测线内测点间距 5 m，各测线平面布置位置如图 3 所示。图根控制点是直接供地形图测绘使用的依据。图根控制点的密度应根据实地地物、地貌的复杂程度，地形图测绘的测量手段和作业方式等情况决定；图根点的密度不得小于 14 个/km²。图根控制点相对于邻近等级控制点的点位中误差不得大于 0.2 m，高程中误差不得大于 0.1 m。图根控制点宜选在地势较高、视野开阔的地方并应设定标志，相邻点间必须通视。

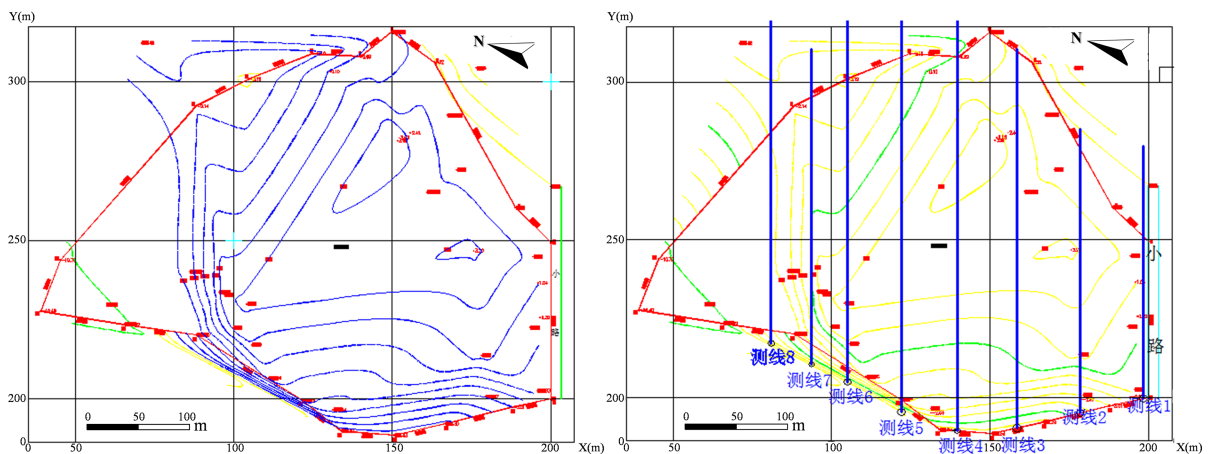


Figure 3. Layout of high density electrical survey lines for the karst cave

图 3. 溶洞高密度电法测线布设图

野外数据采集采用重庆顶峰生产的 EDGMD-600 高密度电法系统。在数据采集前,进行了仪器自检及接地电阻严格检测,确保测量系统工作正常。整个数据采集过程严格遵循相关技术规范及操作规程,保证了测线数据的准确性与可靠性。

4. 岩溶电阻率探测结果分析

4.1. 二维测线数据处理及解释

剔除采集数据中的少量异常点后,采用 Res2Dinv 软件进行二维电阻率反演。结合已有地质资料,对多条剖面不同反演参数下的反演结果进行对比与分析,确定了研究区相对适宜的反演参数。根据反演得到的视电阻率断面图,对测区地层进行划分与解释。

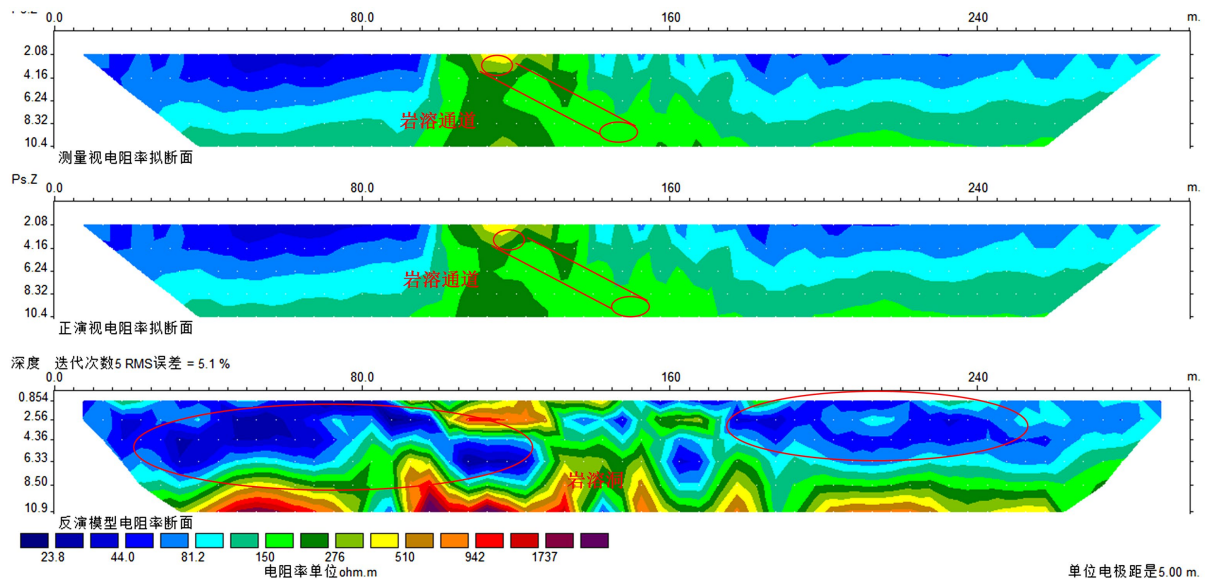


Figure 4. Two dimensional profile showing apparent resistivity contour sections and geological interpretation

图 4. 二维剖面视电阻率等值线断面及地质推断

从 8 条二维视电阻率剖面分析可知,各剖面反演视电阻率对数值主要集中在 $1.0\sim 3.1\ \Omega\cdot\text{m}$ 之间,整体呈浅高、中低、深高的变化规律,电阻率分层特征明显。选取 L2、L4、L8 三条典型剖面进行详细分析(图 4)。从等值线断面图可以看出,三条剖面的电阻率响应特征基本一致,存在明显分界面:浅部电阻率 $1.8\sim 2.7\ \Omega\cdot\text{m}$,对应第四系素填土及粉质黏土层,中部电阻率 $1.0\sim 1.7\ \Omega\cdot\text{m}$ 为低阻层,反映破碎或含水岩层,下部电阻率 $1.7\sim 3.1\ \Omega\cdot\text{m}$ 为中高阻层,对应基底砾岩层。据此,L2 测线推断存在一处大范围岩石破碎或岩溶发育区,L4 测线推断岩溶发育区两处,L8 测线推断近直立型岩石破碎或岩溶发育区一处,同时圈定基岩面溶蚀区一处,为进一步识别和分析天坑区岩溶结构与空间分布提供了依据。

4.2. 组合三维数据处理及解释

对镇雄五德天坑区布设的 8 条二维电阻率测线(L1~L8)进行综合分析表明(图 5),场地岩溶发育具有明显规律性。为进一步刻画基岩面空间形态及岩溶分布特征,对 L1~L8 共 8 条近平行二维电阻率测线进行准三维重构。各测线均采用温纳装置,电极间距 5 m,测线间距 10~20 m。三维数据体并非直接实测获取,而是基于二维反演结果的空间插值构建:以各测线反演电阻率模型为基础,在测线方向(X 向)按 3 m 间距进行加密插值,在测线间方向(Y 向)按实际测线间距(约 24 m 平均值)进行离散扩展,构建 150×20

节点的三维规则网格(对应约 450 m × 480 m 范围); 利用 Res3Dinv 进行等效三维反演计算, 并在 Voxler 中实现体渲染与切片分析。准三维反演方法数据来源本质为二维剖面组合, Y 方向分辨率受测线间距限制明显低于 X 方向。因此, 在垂直测线方向上对异常体形态与连续性的刻画存在一定不确定性, 尤其对小尺度岩溶体的空间展布可能产生平滑效应。

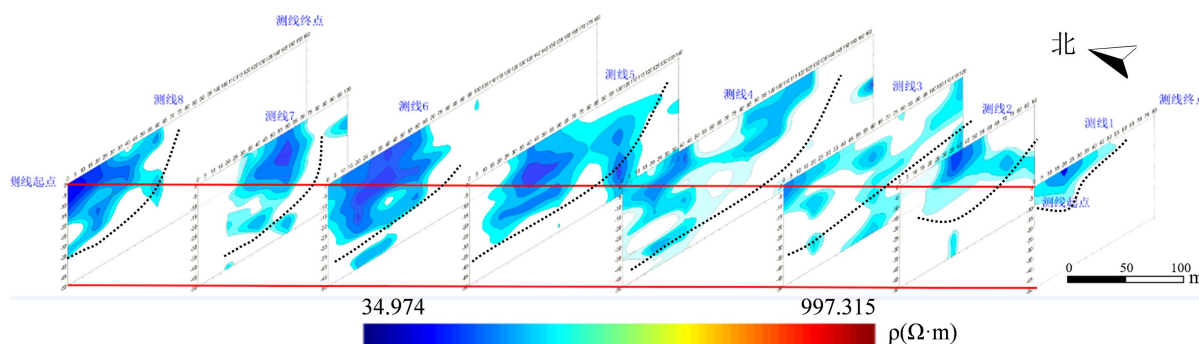


Figure 5. Horizontal slice results at different depths from three dimensional inversion along lines L1 to L8
图 5. L1~L8 线三维反演不同深度水平切片成果

结果显示, 视电阻率对数值介于 0.045~3.19 Ω·m 之间, 整体呈“高-低-高”的垂向分布特征, 与已有地质勘探结果基本一致。对比分析表明, 三维反演所得基岩面起伏趋势与二维剖面一致, 但界面表现更为平缓; 部分二维识别的浅部岩溶异常在三维结果中响应减弱, 而深部低阻异常区具有良好对应关系, 表明多测线融合的三维反演结果具有较高可靠性。如下表 2 所示, 1~8 条测线视电阻率测深剖面结果可明显反演出溶洞底界面在不同深度、不同范围内的分布。

Table 2. Interpretation of apparent resistivity anomaly ranges at the bottom
表 2. 五德天坑溶洞底部视电阻率异常范围解释

测线编号	低视电阻率(<5.3 Ω·m)分布范围/m	低视电阻率(<5.3 Ω·m)深度范围/m	异常响应解释
1	0~55	0~15	以红色线条为界, 低阻区域集中在东部。
2	26~58	0~30	以红色线条为界, 低阻区域集中在中部。
3	0~120	0~35	以红色线条为界, 低阻区域集中西部, 东侧为小道和树林。
4	0~120	0~35	以红色线条为界, 低阻区域集中西部, 东侧为小道和树林。
5	10~125	0~50	以红色线条为界, 低阻区域集中西部, 东侧为小道和树林。
6	0~70	0~50	以红色线条为界, 低阻区域集中西部, 东侧为小山坡和树林。
7	35~75	0~50	以红色线条为界, 测线从东部水沟开始, 低阻区域集中西部。东侧为小山和树林。
8	0~66	0~35	以红色线条为界, 低阻区域集中西部, 东侧为小山坡。

在本次溶洞探测计算采用了地形测量数据和地球物理探查结果划分的地表地形起伏及溶洞底界面形态为依据, 同时也利用三维可视化 Voxler 软件, 输入地形和底界面等数据进行分析。Voxler 是一款专业的三维数据可视化软件, 提供了一种全新的 3D 数据可视化方式。Voxler 可以从多种资源中导入数据, 虽然重心是在三维上面, 但常常可以利用 2D 的网格数据包括 DEM 文件、图片、散点数据。并利用这些数据创建出惊人的图形, 从而能够清晰地看到这些数据间的拓扑关系。从而进行三维网格化、图像处理、体积计算等模型计算。

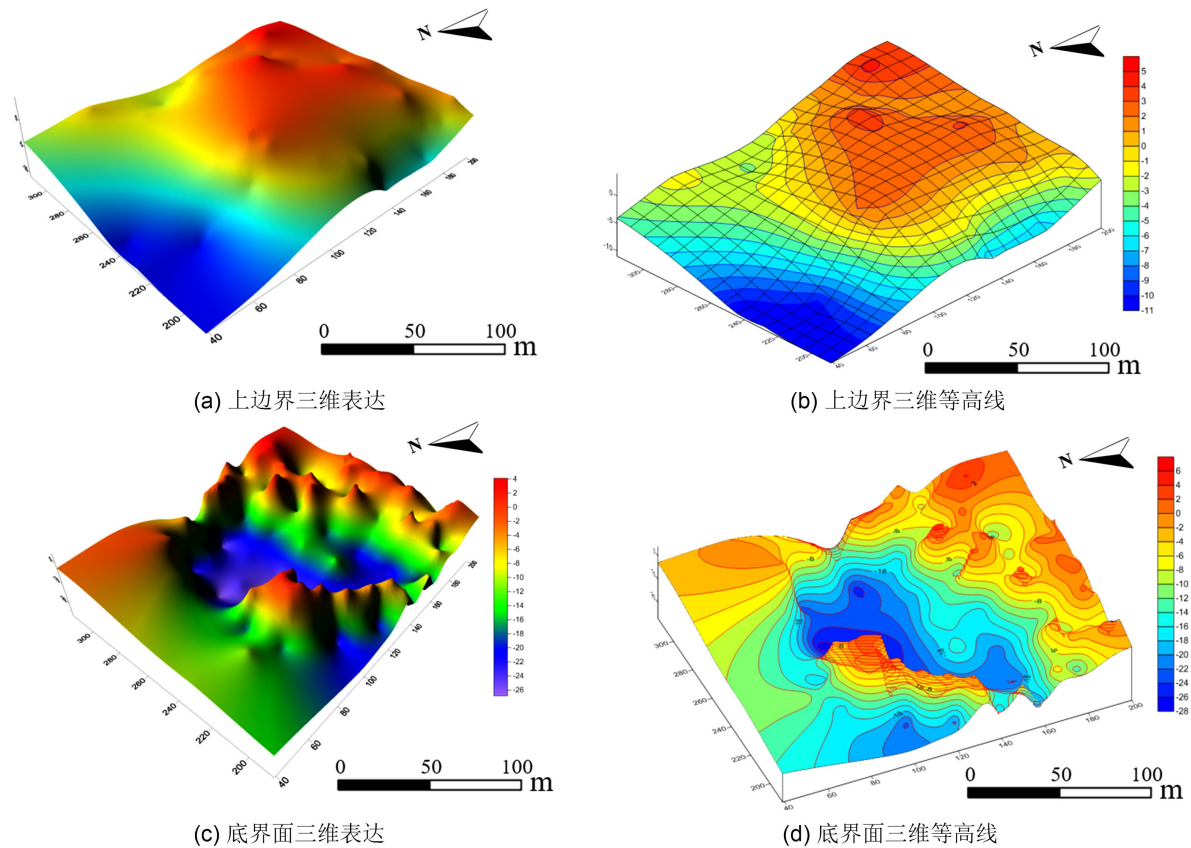


Figure 6. RMS error analysis of high density electrical measurements for Wude Tiankeng karst cave
图 6. L1~L8 线三维反演形体渲染及垂向切片成果

图 6 三维渲染结果表明, 研究区低阻异常主要分布于西北部及对角线东南方向, 形成两条近 NE 向展布的岩溶或破碎带, 与前期地质资料对应良好, 验证了低阻异常对岩溶结构的指示意义。高电阻率区集中于场地中部, 代表相对完整基岩, 与低阻条带呈明显空间分异。基岩面埋深介于 1.09~34.33 m 之间, 整体表现为局部隆起与凹陷交替起伏, 西北部基岩面较浅并向东南逐渐过渡为 NE 向凹陷带。水平切片分析显示, 电阻率在空间上呈规律性高低分带: 浅层低阻主要对应第四系松散沉积或岩溶发育区, 中层反映裂隙发育带, 深部高阻区为完整基岩, 而深部低阻异常则指示岩体破碎或岩溶发育范围向深部延伸。整体上, 岩溶发育受基岩风化程度、节理裂隙发育及水文条件共同控制, 表现出显著的空间分异特征。将三维反演识别的低阻异常现场调研发现, 其总体展布方向为 NE 向(约 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$), 与区内已知岩层产状 ($NE15^{\circ}\sim 20^{\circ}$)及节理裂隙优势方向基本一致, 表明岩溶发育受构造控制显著。结合现场调查资料, A1 异常区附近存在小型塌陷洼地及渗水现象, A2 异常区对应季节性地下水出露点, 进一步验证了低阻异常体与岩溶通道或富水裂隙带之间的对应关系。

4.3. 技术及应用成效探讨

高密度电法反演结果显示, 该剖面具有典型三层电性结构: 表层为低阻层($\rho < 500 \Omega\cdot m$, 厚约 0~15 m), 对应第四系残坡积及冲洪积覆盖层, 电性横向变化明显, 反映沉积物粒度与含水差异; 中部为过渡层($\rho = 500\sim 2\,000 \Omega\cdot m$, 厚约 15~40 m), 主要为风化裂隙发育的碳酸盐岩与碎屑岩; 深部为高阻基岩层($\rho > 4000 \Omega\cdot m$, 埋深 40 m 以下), 对应石炭系灰岩。高阻层中识别出两处低阻异常体: A1 位于 K1+180 处,

埋深 25~35 m, 呈近圆状, 尺度约 12~18 m, 电阻率 200~600 $\Omega\cdot\text{m}$, 推测为充填型溶洞或岩溶破碎带; A2 位于 K1 + 320 附近, 埋深 40~55 m, 呈条带状向 NE 方向延伸, 电阻率 300~700 $\Omega\cdot\text{m}$, 推测为富水裂隙带或岩溶通道。

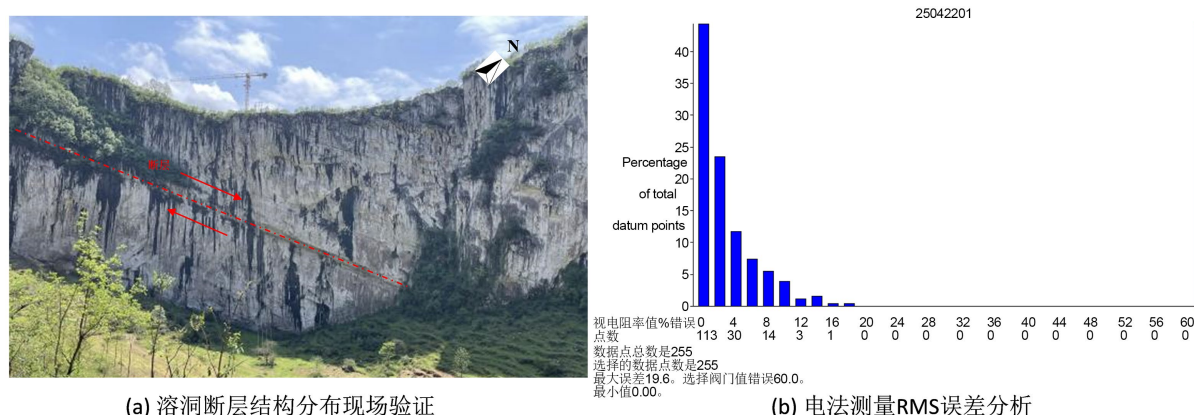


Figure 7. RMS error analysis of high density electrical measurements
图 7. 五德天坑溶洞高密度电法测量 RMS 误差分析

从三维观测系统来看, X 方向(西东向)电极距为 3 m, 能够满足岩溶探测精度要求; 而 Y 方向(南北向)电极距为 24 m, 使实际参与反演计算的数据量有限, 降低了 Y 方向探测精度, 对岩溶空间规模和连通性控制能力不足。图 7 显示, 在三维成果解译中, 呈面积性分布的低阻异常区域可能存在一定偏差, 岩溶定位精度亦略受影响。基于三维反演结果, 研究区低阻异常主要沿 NE 向展布, 构成具有一定连通性的岩溶通道系统。结合区域地层结构与地下水赋存条件分析, 该类通道可能作为地下水径流的主要通道, 在降雨入渗及侧向补给过程中承担快速导水功能, 是区域地下水循环的重要组成部分。从成因上看, NE 向裂隙与碳酸盐岩层理面共同控制溶蚀作用的空间发展, 使岩溶沿优势结构面定向扩展, 逐步形成条带状或串珠状溶洞系统。该结构特征表明, 五德天坑的形成并非单一塌陷事件, 而是受长期地下水溶蚀与结构面控制的渐进演化结果。

5. 结论

本文基于高密度电法二维测线与三维反演处理技术, 系统揭示了镇雄五德天坑区岩溶结构及其空间分布特征。结果表明, 三维可视化能够直观刻画基岩界面起伏及岩溶异常体的空间展布关系, 实现岩溶发育区的定量识别, 验证了高密度电法在复杂岩溶区探测中的有效性与适用性。垂向切片分析显示, 小尺度溶洞及局部破碎带的低阻异常响应相对较弱, 表明单一三维反演在精细识别方面仍存在一定局限。因此, 需结合二维剖面解译进行综合分析, 以提高对小型岩溶体的识别精度。综合研究表明, 岩溶发育明显受构造裂隙与岩层结构控制, 地下水活动在岩溶扩展及天坑演化过程中发挥关键作用。高密度电法与三维可视化技术的耦合应用, 可为高风险岩溶区的地质调查、空间结构解析及工程安全决策提供可靠技术支持。

基金项目

云南省教育厅本科高校教育教学改革研究项目(JG2025078); 云南省教育厅科学研究基金项目(2024J1071); 2024 年度云南省本科高校基础研究联合专项 - 青年项目(202401BA070001-008); 2025 年度昭通市“兴昭人才支持计划”优秀青年人才项目[2025]56 号; 高层次人才科研启动经费(X212250071)。

参考文献

- [1] 王永刚, 李文凯. 综合直流电法在贮灰场岩溶探测中的应用研究[J]. 红水河, 2026, 45(2): 104-109.
- [2] 张磊. 基于高密度电法的闽西南岩溶塌陷探测与灾害预测研究[J]. 甘肃科技, 2026, 42(1): 38-45.
- [3] 谢忻, 袁博文. 综合物探方法在城市盾构隧道岩溶探测中的应用[J]. 科技和产业, 2025, 25(24): 8-16.
- [4] 周晓辉. 高密度电法探测技术在溶洞探测中的应用[J]. 科学技术创新, 2025(22): 98-101.
- [5] 赵立波, 姜守俊, 倪泽华, 等. 高密度电法在广东连南县岩溶探测中的应用研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(6): 1311-1320.
- [6] Bermejo, L., Ortega, A.I., Guérin, R., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Parés, J.M., *et al.* (2017) 2D and 3D ERT Imaging for Identifying Karst Morphologies in the Archaeological Sites of Gran Dolina and Galería Complex (Sierra De Atapuerca, Burgos, Spain). *Quaternary International*, **433**, 393-401. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.031>
- [7] 武小强, 刘彦华, 徐睿知. 综合跨孔探测技术在地铁水域岩溶勘察中的应用[J]. 地质学刊, 2025, 49(2): 221-228.
- [8] 乐昭, 闫海涛, 李志华, 等. 多测道频率域激电法在公路岩溶探测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2025, 22(3): 354-361.
- [9] 涂凤祥. 高密度电法在福建某岩溶地区地面塌陷勘察中的应用[J]. 能源与环境, 2025(1): 87-89.
- [10] 林才德, 唐孟雄, 刘祥泰, 等. 高密度电阻率法在城市岩溶探测中的应用研究[J]. 广州建筑, 2025, 53(2): 50-54.
- [11] 李磊, 周明伟, 王玉峰. 高密度电法在临沂石灰岩岩溶探测中的应用[J]. 山东国土资源, 2025, 41(2): 51-57.
- [12] 钟燕青, 李升科. 高密度电法与瞬变电磁法在溶洞探测中的应用[J]. 资源信息与工程, 2024, 39(6): 48-52.
- [13] 周学义, 聂俊丽, 龙举. 遵义市某小区复杂溶洞精细化探测及建模[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 147-157.
- [14] Maślakowski, M., Lejzerowicz, A., Pacanowski, G. and Kuszyk, R. (2024) The Use of Non-Invasive ERT Method to Diagnose Karst in Roadengineering in the Lublin Upland (Poland). *Archives of Civil Engineering*, **70**, 557-571. <https://doi.org/10.24425/ace.2024.148928>
- [15] Liu, R., Sun, H., Wang, Z., Fan, Q., Liu, S., Lin, J., *et al.* (2023) Investigation of Subsurface Karst in an Opencast Mine in Southwestern China via Surface and Cross-Borehole Electrical Resistivity Tomography. *Exploration Geophysics*, **54**, 685-695. <https://doi.org/10.1080/08123985.2023.2225538>
- [16] 张建太, 宗传攀, 李付全, 等. 三维高密度电法对岩(土)层界面及岩溶塌陷的响应研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1121-1132.
- [17] 张恒, 孟宝华. 综合物探方法在某市政道路岩溶勘察中的应用[J]. 土工基础, 2024, 38(5): 746-749, 784.
- [18] 付敏. 高密度电法在石灰岩地区溶洞探查中的应用[J]. 福建地质, 2024, 43(3): 222-227.
- [19] 胡浩, 薛永仁, 张绪祥. 三维高密度电法在浅表溶洞探测中的应用研究[J]. 水利水电快报, 2024, 45(S1): 7-9.